

인간형 로봇관절의 개발

류성무* · 백상훈** · 최혁렬***
(2000년 4월 17일 접수)

Development of Anthropomorphic Robotic Joint

Sungmoo Ryew, Sanghoon Baik and Hyoukryeol Choi

Key Words: Anthropomorphic(인간형), Double Active Universal Joint(이중 능동 유니버설 관절)

Abstract

In this paper, we present a new two-dof anthropomorphic joint mechanism that enables to mimic the humanlike motion. The proposed mechanism, called Double Active Universal Joint(DAUJ), generates a two-dof swivel motion without rolling by the coupled motion of two independent motor. In addition, we perform basic experiments to confirm the effectiveness of the proposed mechanism and the results are reported.

1. 서론

최근 인간을 모방한 로봇, 혹은 휴먼로봇(human robot, humanoid)에 관한 연구가 활발하게 수행되고 있다. 휴먼로봇의 연구에 있어서 가장 기본적인 과제는 인간의 자연스러운 운동을 재현할 수 있는 메커니즘의 개발이다. 새로운 메커니즘에 관한 영감은 인간의 운동을 세심하게 관찰하거나 분석하여 얻어질 수 있으며, 이로부터 얻어진 인체운동의 특징이 실제 메커니즘의 설계에 구현되어야 한다. 본 논문에서는 장골(metacarpal joint), 어깨, 목, 고관절(hip joint)같이 인체에 있는 다자유도 관절에서 흔히 볼 수 있는 운동의 특징을 재현할 수 있는 2자유도 관절 메커니즘을 제안한다. 예시한 인체관절의 중요한 특징 중 하나는 구름(rolling) 없는 회전운동이 가능하다는 점이다. 본 논문에서 제안한 로봇관절은 이와 같은 특징을 완벽하게 모사 할 수 있다.

이와 관련된 연구를 살펴보면 Bejczy는 마스터-슬레이브 시스템에 손의 장골이나 팔의 어깨관절

에서 볼 수 있는 것과 같은 움직임을 나타낼 수 있는 구조의 관절을 사용한 적이 있다.⁽¹⁾ 또한, Stackhouse는 베벨기어를 이용하여 Three-Roll-Wrist라고 알려져 있는 3자유도 손목관절을 제안하였다.⁽²⁾ Stackhouse의 메커니즘은 첫 번째 축과 세 번째 축이 동일선상에 존재하고 두 번째 축은 이들과 일정하게 비스듬한 각도를 갖도록 되어 있는 것으로 각 축이 모두 구름운동을 함으로서 3자유도의 회전운동을 할 수 있다. 한편, Hirose는 Bejczy가 제안한 메커니즘을 바탕으로 인접한 관절의 회전축 사이에 경사각을 갖는 관절을 제안하였으며 이 관절을 뱀처럼 이동하는 다관절 로봇에 사용하였다.⁽³⁾ Hirose의 메커니즘을 경사선회관절(oblique swivel joint)이라고 부르며 작업영역이 일반적인 로봇의 수직이나 수평관절처럼 구동기의 회전각도에 따라 결정되지 않고 기구적으로 이보다 적은 각도로 제한되는 문제가 있으나 중량 대 하중비가 큰 장점이 있다. 한편 1985년에 Ikeda 등은 유니버설관절과 경사선회관절을 결합한 인간형 2자유도 능동유니버설관절(active universal joint)에 관한 특허를 등록하였다.⁽⁴⁾ 또한, 이 메커니즘을 JPL의 Paljug 등은 12자유도 Serpentine로봇의 관절로 사용하였다.⁽⁵⁾ 그밖에 Asano⁽⁶⁾나 Nilsson⁽⁷⁾의 뱀과 같은 로봇에서도 2자유도 관절이 사용된 예가 있다. 그러나 yaw운동과 pitch운동으로만 구성된 인간의 관절과 비교할 때 이들

* 회원, 성균관대학교 대학원 기계설계학과

E-mail : toto@mecha.skku.ac.kr

TEL : (031)290-7481 FAX : (031)290-5849

** 성균관대학교 대학원 기계설계학과

*** 회원, 성균관대학교 기계공학부

메커니즘은 여전히 roll운동을 하고 있으며 인간 관절의 운동과 운동범위를 고려할 경우 인간형이라고 보기에는 미흡하다.

지금까지 발표된 많은 연구결과들은 다수의 관절이 직렬로 연결된 형태의 로봇에 사용된 예가 대부분이며 실용적인 면에서 많은 문제를 갖고 있다. 본 논문에서 제안한 이중능동유니버설관절(Double Active Universal Joint)은 경사전회관절에 외부·내부 유니버설 관절을 추가함으로써 기존의 메커니즘들이 갖는 단점을 보완하고 완벽하게 인간형 관절을 모사 할 수 있는 2자유도 관절 메커니즘이다. 손가락과 같은 2자유도 인간 관절 메커니즘이 갖는 특징은 기구적으로는 구름이 없는 운동을 재현할 수 있어야 하며 또한, 능동적으로 기계적인 강성을 제어할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 제안된 메커니즘의 설계, 기구해석에 관하여 기술하려고 한다. 논문의 구성을 살펴보면 2장에서는 제안된 메커니즘의 개념에 관하여 설명하게 될 것이며 3장에서는 메커니즘의 구조에 대한 설명을 하고 있고 4장에서는 기구해석을 수행한 결과를 포함하고 있다. 5장에서는 로봇손가락의 장골(metacarpal joint)과 관절형 이동로봇에 능동유니버설관절을 적용한 예를 간단한 실험결과와 함께 보여주게 될 것이다. 끝으로 결론에서는 제안된 관절의 유용성에 관하여 언급하게 될 것이다.

2. 연구의 배경

인간의 손에서 엄지를 제외한 나머지 손가락의 기구학적 구조를 분석하여 보면 장골은 2자유도, 나머지 두 관절은 각각 1자유도로 구성된 총 4자유도의 메커니즘으로 모델링(modeling)할 수 있다. 이 중 장골은 통상 두 개의 수직축이 한 점에서 교차하는 2자유도 관절로 모델링한다. 따라서, 지금까지 인간의 손을 모방하여 개발된 로봇손들은 모두 장골에서 두 개의 축이 수직으로 교차하는 구조의 2자유도 관절을 갖고 있다. Fig. 1은 가장 대표적인 로봇손의 하나인 Utah/MIT hand의 손가락 구조를 나타낸 것이다.⁽⁸⁾ Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 장골에서 두 개의 축이 수직으로 교차하는 기구학적 구조로 되어 있다.

그러나, 인간손과 Fig. 1에 나타낸 로봇손의 움

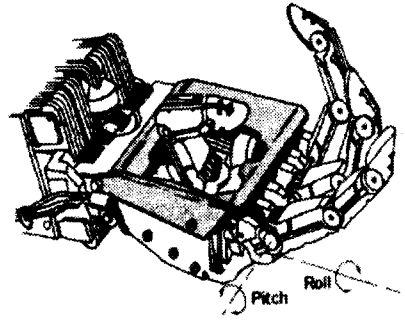


Fig. 1 Typical two-dof joint (Utah/MIT hand)

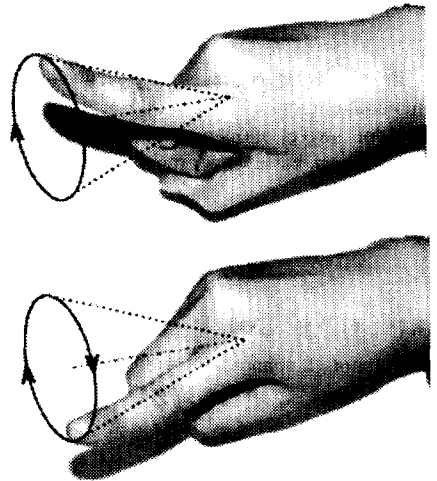


Fig. 2 Swiveling of index finger without rolling

직임에는 많은 차이가 있다. Fig. 1의 손가락을 관절3은 완전히 펴고 관절2를 45도 정도 굽힌 상태에서 고정시켜 놓고 관절1을 회전시켜 손가락이 원뿔모양을 그리도록 하여 보자. 이 때 관절1을 180도 회전하였을 경우 손가락은 세 번째 링크의 길이방향을 중심으로 roll운동하게 되어 손끝이 뒤집히게 된다. 반면에 Fig. 2와 같이 인간손의 경우 손등을 보고 있는 상태에서 손가락을 펴고 장골이 원추운동을 할 경우 로봇손과는 다르게 항상 손톱이 있는 면을 바라볼 수 있게 된다. 인간의 손가락은 roll운동을 하지 않으며 Fig. 1과 같은 메커니즘으로 인간손과 동일한 움직임을 구현하기 위해서는 적어도 세 개의 독립된 관절이 필요하게 된다. 이와 같은 운동상의 특징은 인간과 같이 손의 안쪽과 바깥쪽의 기능이 명확

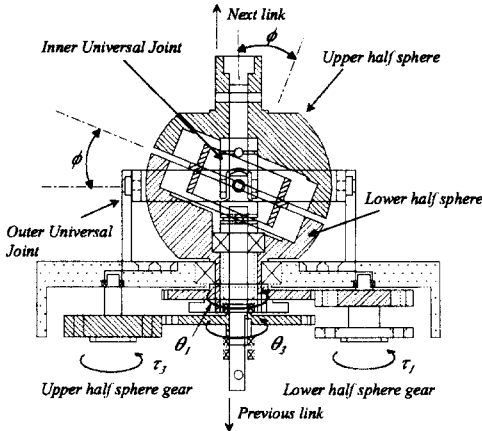


Fig. 3 Mechanism of DAUJ

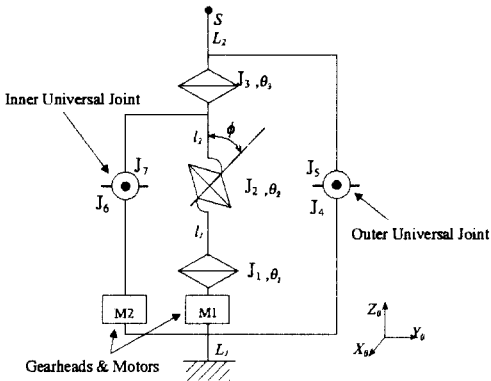


Fig. 4 Kinematic diagram

하계 구분이 되는 인체시스템에 있어서 매우 중요한 점이다. roll운동을 억제함으로써 파지시 항상 손바닥 면이 물체와 접촉할 수 있으며 손바닥의 반대편에 부착된 손톱은 다른 목적으로 사용할 수 있는 것이다.

3. 메커니즘 구조

개발한 능동 유니버설 관절은 Fig. 3에서와 같이 빗면을 이루고 있는 두 개의 반구와 두 개의 유니버설 관절로 구성되어져 있다. Fig. 4는 제안한 관절의 간소화한 기구학적 구조이다. 그림에서 J_1 와 θ_1 는 각각 i 번째 관절과 관절각을 의미하며, l_i 는 관절 사이의 거리, L_i 는 i 번째 링크를 의미한다. J_4, J_5 는 외부 유니버설 관절로

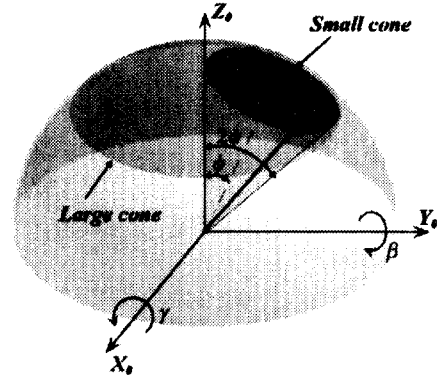


Fig. 5 Workspace of Double Active Universal Joint

축 방향 회전운동(roll)이 일어나지 않도록 전체관절을 잡아주며, 내부 유니버설 관절 J_6, J_7 는 관절 J_3 로 동력을 전달하는 역할을 한다. 이 두 개의 유니버설 관절은 관절 J_2 와 회전 중심이 동일하다. 제안하는 메커니즘에서 능동적으로 구동되는 관절은 단지 J_1 과 J_3 이며 각각 M_1, M_2 을 동력원으로 하고 있다. 관절 J_2 는 ϕ 만큼 기울어진 빗면을 가지고 있으며 외부 유니버설 관절 J_4, J_5 에 의하여 회전이 제한된 상태로 θ_1 과 θ_3 의 각에 따라 상대적으로 운동한다. 앞서 서술한 바와 같이 제안하는 이중 능동 유니버설 관절은 roll운동이 제한된 2자유도 관절이며 운동특성은 인간의 장굴 운동과 매우 유사하다. Fig. 5는 이중 능동 유니버설 관절의 운동영역이다. 점 S 는 Fig. 4의 링크 L_2 끝단의 위치이며 ϕ 만큼 기울어진 작은 원뿔을 빗면을 가진 위 반구의 움직임에 의해 발생하는 운동영역이고 아래 반구의 운동에 의한 전체 운동영역은 Z 축에 2ϕ 각으로 회전한 큰 원뿔의 영역이다.

4. 기구학

제안하는 이중능동유니버설관절의 기구학은 Fig. 4의 기본적인 기구학적 모델을 바탕으로 해석해 낼 수 있다. 이때 내부 회전 관절 $J_{1,2,3}$ 와 외부 유니버설관절 $J_{4,5}$ 는 폐회로(closed loop)를 구성하고 있으며, 동일한 회전 중심을 가지므로

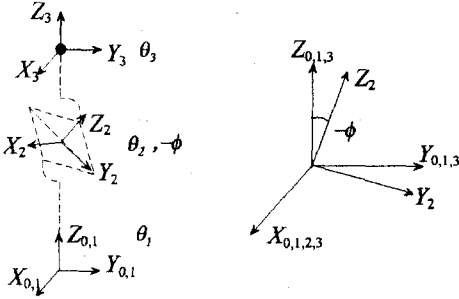


Fig. 6 Kinematic parameters and frame assignment

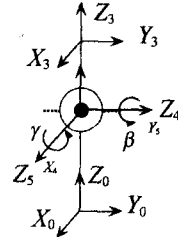


Fig. 7 Coordinate frame assignment for the outer universal joint

l_1, l_2 는 무시하여 해석할 수 있다.

4.1 기구해석

본 절에서는 회전운동을 제한하는 폐회로 메커니즘의 기구학을 해석하기 위해서 내부의 빗면을 가진 관절과 외부 유니버설관절로 나누어 해석한다.

내부 빗면관절(oblique joint)은 관절의 회전을 결정하는 역할을 하며, Fig. 4에서와 같이 ϕ 만큼 기울어진 윗면 반구와 아래 반구로 구성된다. Fig. 6는 내부 빗면관절의 좌표계와 파라미터들을 보여주고 있다. 그림에서 Σ_2 는 내부빗면관절에 부착된 좌표계이며 Σ_0 은 L_1 에 고정된 좌표계이다. 이때 θ_1 은 첫 번째 모터에서 θ_3 는 내부 유니버설관절 $J_{6,7}$ 을 거쳐 두 번째 모터에 의해 결정된다. 페루프에서 Σ_0 에서 Σ_3 로의 첫 번째 변환 행렬은 식 (1)의 방법으로 구할 수 있으며 계산된 행렬은 식 (2)와 같다.

$${}^0_3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = {}^0_1T(\theta_1) {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) \quad (1)$$

$${}^0_3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = \begin{bmatrix} c_1c_2c_3 - c_2c_\phi^2s_1s_3 - c_3c_\phi s_1s_2 - c_1c_\phi s_3s_2 - s_1s_3s_\phi^2 & & & \\ c_3c_2s_1 + c_1c_2c_\phi^2s_3 + c_1c_3c_\phi s_2 - c_\phi s_1s_2s_3 + c_1s_3s_\phi^2 & & & \\ c_\phi s_3s_\phi - c_2c_\phi s_3s_\phi - c_3s_2s_\phi & & & \\ 0 & & & \\ -c_3c_2c_\phi^2s_1 - c_1c_2s_3 - c_1c_3c_\phi s_2 + c_\phi s_1s_2s_3 - c_3s_1s_\phi^2 & -c_\phi s_1s_\phi + c_2c_\phi s_1s_\phi + c_1s_2s_\phi & 0 & \\ c_1c_2c_3c_\phi^2 - c_3c_\phi s_1s_2 - c_2s_1s_3 - c_1c_\phi s_2s_3 + c_1c_3s_\phi^2 & c_1c_\phi s_\phi - c_1c_2c_\phi s_\phi + s_1s_2s_\phi & 0 & \\ c_3c_\phi s_\phi - c_3c_2c_\phi s_\phi + s_2s_3s_\phi & c_\phi^2 + c_2s_\phi^2 & 0 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이때, $c_n \triangleq \cos(\theta_n), s_n \triangleq \sin(\theta_n), \dots$ 이다.

앞서 폐회로 구조에서 구하여진 Σ_0 에서 Σ_3 로의 변환행렬은 다른 방향의 외부유니버설관절을 이용하여 다른 방법으로 구할 수 있다. 이 변환행렬은 앞서 구한 변환행렬의 자유도를 제한하게 되며, 제안하는 관절의 회전 제한요소를 해석하는 데 중요한 부분으로 사용된다. Fig. 7은 전체관절의 축방향 회전을 제한하는 외부유니버설관절이며 Σ_4 와 Σ_5 에서 각각 β, γ 로 회전한다. Σ_3 의 축방향을 고려하여 구한 변환 행렬은 식 (3)과 같이 β 와 γ 의 함수 형태로 나타난다.

$${}^0_3T(\beta, \gamma) = {}^0_4T(\beta) {}^4_5T(\gamma) {}^5_3T(\hat{y}, -\pi/2) = \begin{bmatrix} c_\beta & s_\beta s_\gamma & c_\gamma s_\beta & 0 \\ 0 & c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

이때 $(\hat{y}, -\pi/2)$ 의 의미는 y축을 중심으로 $-\pi/2$ 만큼 회전하는 변환 행렬을 의미한다.

Fig. 4에서 Σ_0 에서 Σ_3 로의 변환행렬은 두 가지 다른 변환행렬로 표현할 수 있다. 첫 번째는 식 (1)이고 다른 방법은 식 (3)이다. 이 두 가지 변환 행렬의 결과는 식 (4)와 같이 동일하게 놓을 수 있다.

$${}^0_3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) = {}^0_3T(\beta, \gamma) \quad (4)$$

이때 폐회로 관계에 의해 제한된 θ_2 의 움직임은 식 (4)의 성분 2,1의 방정식을 계산하여 θ_1, θ_3 의 함수로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_1 &= c_\phi c_{13} \sqrt{c_\phi^2 + (c_3^2 - c_1^2) s_\phi^2} \\ W_2 &= -c_1 s_3 s_\phi^2 (c_3 s_1 + c_1 c_\phi^2 s_3) \\ W_3 &= (c_1^2 c_\phi^2 + s_1^2)(c_3^2 + c_\phi^2 s_3^2) \\ \theta_2 &= \frac{-s_{13}}{|s_{13}|} \text{Arccos}\left(\frac{|c_{13}| W_1 + c_{13} W_2}{c_{13} W_3}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

이때, $c_{12} \triangleq \cos(\theta_1 + \theta_2)$, $s_{12} \triangleq \sin(\theta_1 + \theta_2)$ 이다.

그러므로 제안하는 이중 능동 유니버설 관절은 단지 2자유도(β, γ) 만을 가지며 θ_1 과 θ_3 를 액츄에이터로 제어하여 축 방향 회전이 없는 2 자유도 관절을 구현한다.

4.2 좌표계 변환

관절 시스템의 방위를 표현하는 방법 중에 일반적으로 자주 사용하는 표현법으로 Z-Y-X 오일러각이 있다. 이 표현법은 Z축 방향으로 α 만큼 회전, Y축에 대해 β 만큼 회전, X축에 대해 γ 로 순차적으로 회전하여 방위를 표현한다. 제안하는 관절의 기구학을 해석하기 위하여 Z-Y-X 오일러 각을 도입하였으며 제안하는 관절은 축 방향 회전이 없으므로 식 (6)과 같이 α 를 0으로 하여 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^0_3T_{ZYX} &= T_Z(0) T_Y(\beta) T_X(\gamma) \\ &= \begin{bmatrix} c_\beta & s_\beta s_\gamma & c_\gamma s_\beta & 0 \\ 0 & c_\gamma & -s_\gamma & 0 \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

결국 식 (6)의 결과는 식 (3)과 동일함을 확인할 수 있으나, 식 (3)은 외부유니버설 관절의 구조에 대한 해석이며 식 (6)은 전체 관절의 방위를 일반적인 표현법 중에 오일러 각으로 나타낸 것이다. 따라서 식 (3),(4),(6)의 관계에서 식 (7)을 얻을 수 있다.

$${}^0_3T_{ZYX} = {}^0_3T(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \quad (7)$$

제안하는 관절의 Z-Y-X 오일러 각에 대한 순기구학은 식 (7)의 행렬 성분 2,2와 2,3(또는 1,1과 1,3)의 연립 방정식으로 풀어 낼 수 있으며 그 해는 식 (8),(9)와 같다.

$$\beta = \text{Arctan2}(c_3 s_2 s_\phi - c_\phi s_3 s_\phi + c_2 c_\phi s_3 s_\phi, \quad (8)$$

$$c_1 c_2 c_3 - c_3 c_\phi s_1 s_2 - c_2 c_\phi^2 s_1 s_3 - c_1 c_\phi s_2 s_3 - s_1 s_3 s_\phi^2)$$

$$\gamma = \text{Arctan2}(-c_1 c_\phi s_\phi + c_1 c_2 c_\phi s_\phi - s_1 s_2 s_\phi, \quad (9)$$

$$c_1 c_2 c_3 c_\phi^2 - c_3 c_\phi s_1 s_2 - c_2 s_1 s_3 - c_1 c_\phi s_2 s_3 + c_1 c_3 s_\phi^2)$$

관절의 역기구학을 해석해 내기 위해서는 앞서 해석한 순기구학과 반대로 β 와 γ 로 각 관절각 $\theta_{1,2,3}$ 을 표현해 낸다.

θ_2 의 역기구학은 식 (7)의 성분 3,3의 방정식에서 식 (10)을 구할 수 있다.

$$\theta_2 = \pm \text{Arccos}\left(\frac{c_\beta c_\gamma - c_\phi^2}{s_\phi^2}\right) \quad (10)$$

이때, θ_2 는 양과 음의 두 종류의 해를 가질 수 있으므로 이전 값과 연속되는 값으로 그 해를 선택해 낼 수 있다.

θ_1 의 역기구학은 식 (7)을 변형한 식 (11)의 요소 1,3의 방정식에서 구할 수 있으며,

$${}^0_1T(\theta_1)^{-1} \cdot {}^0_3T_{ZYX} = \frac{1}{2}T(\theta_2) \frac{2}{3}T(\theta_3) \quad (11)$$

그 해는 식 (12)와 같다.

$$\theta_1 = -\frac{|s_\beta|}{s_\beta} \text{Arccos}\left(\frac{c_\gamma s_2 s_\beta s_\phi}{c_\gamma^2 s_\beta^2 + s_\gamma^2} \frac{\sqrt{c_\gamma^2 s_\beta^2 + s_\gamma^2 - s_2^2 s_\phi^2}}{c_\gamma^2 s_\beta^2 + s_\gamma^2}\right) \quad (12)$$

θ_3 의 역기구학은 식 (13)의 요소 3,1과 3,2에서 구할 수 있으며,

$${}^{\frac{1}{2}}T(\theta_2)^{-1} \cdot {}^0T(\theta_1)^{-1} \cdot {}^0T_{ZYX} = {}^{\frac{2}{3}}T(\theta_3) \quad (13)$$

그 해는 식 (14)와 같다.

$$\theta_3 = \text{Arctan2}\left(\frac{-c_\phi s_\beta - c_\beta s_\phi}{s_\phi}, \frac{c_\beta c_\phi s_\gamma + c_1 c_\gamma s_\phi - s_1 s_\gamma s_\beta s_\phi}{s_\phi}\right) \quad (14)$$

4.3 각속도

각 속도 $\dot{\theta}_2$ 는 관절 구조의 식 (4)와 (5)에서의 폐회로 제한 조건식에 의하여 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dot{\theta}_1, \dot{\theta}_3$ 의 함수의 형태로 식 (15)와 같이 표현되어 진다.

$$\dot{\theta}_2 = \frac{V_1 + V_2 \dot{\theta}_1 + V_3 \dot{\theta}_3}{-c_2 c_{13} c_\phi + c_3 s_1 s_2 + c_1 c_\phi^2 s_2 s_3} \quad (15)$$

$$V_1 = c_1 c_2 c_3 - c_1 c_\phi s_2 s_3$$

$$V_2 = -s_1 (c_3 c_\phi s_2 + c_2 s_\phi^2 s_3 + s_3 s_\phi^2)$$

$$V_3 = c_1 c_2 c_3 c_\phi^2 - c_2 s_1 s_3 - c_\phi s_2 s_{13} + c_1 c_3 s_\phi^2$$

각 링크 좌표계에 대한 각속도의 기본 방정식은 식 (16)와 같다.

$${}^{i+1}w_{i+1} = {}^iR^i w_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}Z_{i+1} \quad (16)$$

이때, ${}^i(*)_j$ 는 좌표계 Σ_i 에서 관절 j 의 각속도를 나타낸다. Fig. 3에서 빗면 관절의 아래 반구에 대한 각속도는 식 (17), (18)과 같이 구해진다.

$${}^1w_1 = {}^0R^0 w_0 + \dot{\theta}_1 {}^1Z_1 \quad (17)$$

$${}^1w_1 = \begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

빗면관절의 위 반구에 대한 각속도는 식 (19),(20)와 같이 구해진다.

$${}^2w_2 = {}^1R^1 w_1 + \dot{\theta}_2 {}^2Z_2 \quad (19)$$

$${}^2w_2 = \begin{bmatrix} c_2 & c_\phi s_2 & -s_\phi s_2 \\ -s_2 & c_\phi c_2 & -c_2 s_\phi \\ 0 & s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} -s_\phi s_2 \dot{\theta}_1 \\ -c_2 s_\phi \dot{\theta}_1 \\ c_\phi \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

링크 L_2 에 대한 각속도는 식 (21),(22)와 같이 구해진다.

$${}^3w_3 = {}^2R^2 w_2 + \dot{\theta}_3 {}^3Z_3 \quad (21)$$

$${}^3w_3 = \begin{bmatrix} c_3 & s_3 c_\phi & s_3 s_\phi \\ -s_3 & c_3 c_\phi & c_3 s_\phi \\ 0 & -s_\phi & c_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -s_\phi s_2 \dot{\theta}_1 \\ -c_2 s_\phi \dot{\theta}_1 \\ c_\phi \dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c_\phi s_3 s_\phi - c_3 c_\phi^2 s_2 s_\phi - c_2 c_\phi s_3 s_\phi - c_3 s_2 s_\phi^3 & s_3 s_\phi & 0 \\ c_3 c_\phi s_\phi - c_2 c_3 c_\phi s_\phi + c_\phi^2 s_2 s_3 s_\phi + s_2 s_3 s_\phi^3 & c_3 s_\phi & 0 \\ c_\phi^2 + c_2 s_\phi^2 & c_\phi & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

베이스 링크 L_1 에 대한 L_2 의 각속도는 식 (23), (24)와 같이 구해진다.

$${}^0w_3 = {}^0R^3 w_3 \quad (23)$$

$${}^0w_3 = \begin{bmatrix} 0 & -s_1 s_\phi & -c_\phi s_1 s_\phi + c_2 c_\phi s_1 s_\phi + c_1 s_2 s_\phi \\ 0 & c_1 s_\phi & -c_1 c_\phi s_\phi + c_1 c_2 c_\phi s_\phi - s_1 s_2 s_\phi \\ 1 & c_\phi & (1 + c_\phi^2 - s_\phi^2)/2 + c_2 s_\phi^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad (24)$$

4.4 자코비안과 특이해

링크 좌표계에서의 관절속도를 직교좌표계와 연관시키는 자코비안은 식 (22)에서 식 (25)를 얻을 수 있다.

$${}^3w_3 = {}^3J(\theta) \dot{\theta} \quad (25)$$

이때 $\dot{\theta} = [\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3]^T$,

$${}^3J(\theta) = \begin{bmatrix} c_\phi s_3 s_\phi - c_3 c_\phi^2 s_2 s_\phi - c_2 c_\phi s_3 s_\phi - c_3 s_2 s_\phi^3 & s_3 s_\phi & 0 \\ c_3 c_\phi s_\phi - c_2 c_3 c_\phi s_\phi + c_\phi^2 s_2 s_3 s_\phi + s_2 s_3 s_\phi^3 & c_3 s_\phi & 0 \\ c_\phi^2 + c_2 s_\phi^2 & c_\phi & 1 \end{bmatrix}$$

이다.

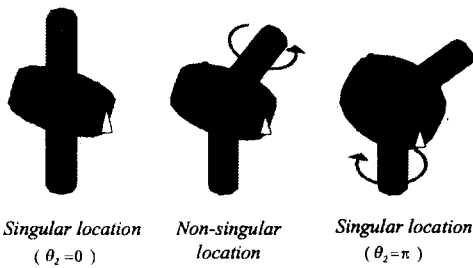


Fig. 8 Schematic diagram of singular configurations

관절의 특이해는 역변환이 존재하지 않는 경우로 ${}^3J(\theta)$ 의 행렬식(determinant)의 값이 0인 방정식을 풀어 구할 수 있다. 제안하는 관절의 행렬식은 식 (26)과 같다.

$$\det|{}^3J(\theta)| = -\cos^2\phi \sin\theta_2 \quad (26)$$

식 (26)에서 관절의 특이해는 $\sin\theta_2=0$ 일 때 발생되며, 특이해가 발생하는 위치는 Fig. 8에서와 같이 두 개의 축에 대한 빗면의 최고점과 최하점이 서로 만난 지점($\theta_2=0$)과 두 최고점이 만난 지점($\theta_2=\pi$)이다.

5. 적용사례 및 실험

Fig. 9은 지하매설 배관 내부 주행용 이동로봇의 조향메커니즘이며 본 연구에서 제안하는 이중 유니버설 관절을 사용하였다.^(9,10) 배관내부 주행용 이동로봇은 배관내부의 벽면을 압착한 상태로 수평, 수직, 곡관 및 분지관을 주행하는 시스템으로 조향시 축방향 회전이 발생되면 압착상태를 유지할 수 없다. 따라서 본 연구에서 제안하는 축방향 회전이 없는 인간형 관절은 매우 유용하게 적용될 수 있다. Fig. 10는 제안하는 이중 능동 유니버설 관절의 토크증가와 기계적 강성제어를 위하여 강인한 구조와 동력부에 클러치를 추가하여 개발된 로봇 관절의 세부구조이다.

제안하는 관절의 제어성능을 검증하기 위하여 PID제어기를 사용한 위치제어 실험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 11과 같다. 결과에서 확인할 수 있는 것과 같이 위치 추정에 발생하는 오차는

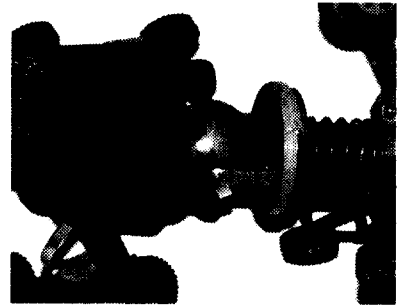


Fig. 9 Application of inpipe inspection robot with DAUJ

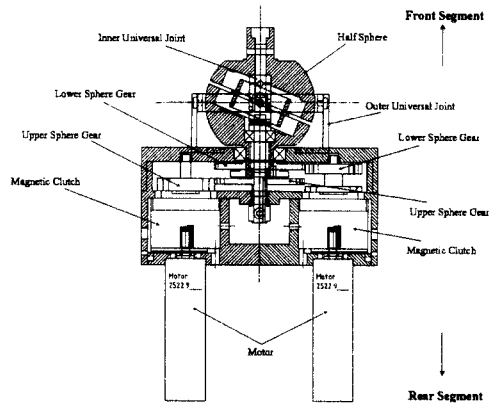
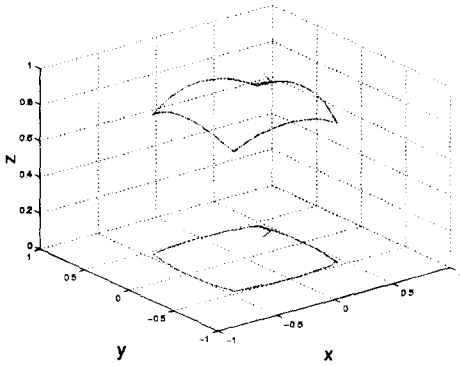


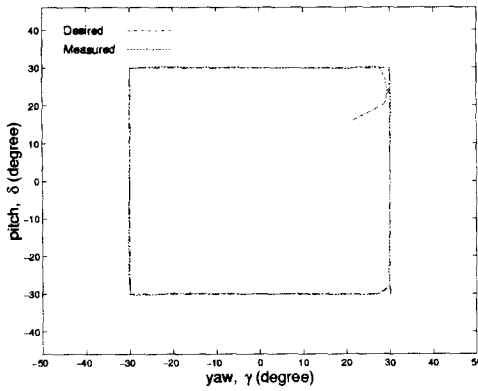
Fig. 10 Detailed mechanism of DAUJ in inpipe inspection robot

무시할 만 하며 관절의 기구학 해석 결과를 검증할 수 있다.

Fig. 12은 로봇손의 손가락 장골에 응용된 이중 능동 유니버설 관절이며 본 연구에서 제안한 바와 같이 인간과 유사한 구조와 운동을 보여준다.^(11,12) Fig. 13는 로봇손의 세부구조이며 장골 구동을 위하여 2개의 모터와 손가락 관절 구동을 위한 또 하나의 모터로 구성되어 있다. 로봇 손가락 장골은 축방향의 회전 없이 2자유도의 움직임 가지며 Fig. 14에서와 같이 물체의 파지나 감지시 같은 손가락의 면을 접촉면에 닿게 된다. 이것은 인간의 손가락과 매우 유사한 형태이며 물체의 감지에 있어 매우 유용하게 사용될 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 11 Tracking of rectangular trajectories; (a) 3D trajectory (b) yaw and pitch angles

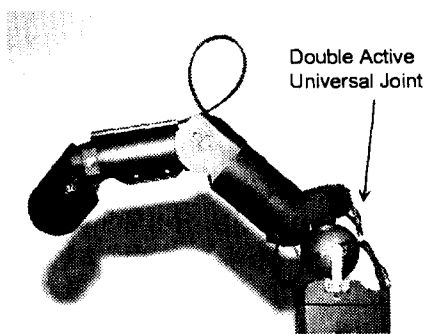


Fig. 12 Anthropomorphic finger module make use of DAUJ

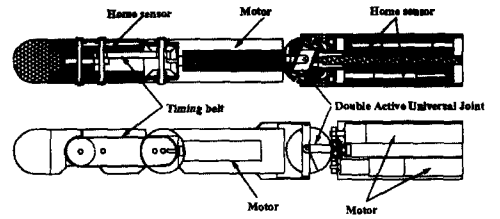


Fig. 13 Detailed mechanism of finger module



(a)



(b)



(c)

Fig. 14 Finger movement using double active universal joint

6. 결 론

제안한 인간형 로봇 관절에 대한 완벽한 기구학적 해석을 하고 배관 주행로봇과 로봇손의 두 가지 로봇에 적용하여 그 실효성과 성능을 검증하였다. 이중능동 유니버설관절은 기존의 손목관절이나 장골의 기능을 수행하는 관절에 비하여 2 자유도의 회전 중심이 동일한 점에 위치하며 인간과 유사한 축 방향 회전이 없는 운동을 구현한다는 점에 특징을 두고 있다. 또한 비교적 구조가 간단하여 부피와 하중 비 토크가 큰 장점을 가지고 있다. 기본적인 유니버설관절을 가지고 있어 운동영역의 한계가 있으나 생물의 관절 운동영역의 범위 이상의 운동영역을 가지고 있으며, 빗면관절의 특이점 문제는 메커니즘 설계시 특이점의 고려와 특이성 회피 제어를 구현할 필요가 있다. 제안된 메커니즘의 장점을 살릴 수 있는 응용 분야는 더욱 다양하다고 생각되며 이에 관련된 연구가 활성화되기를 희망한다.

후 기

본 논문은 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 지원으로 수행되어진 것으로 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Bejczy, A., 1975, "Distribution of Control Decisions in Remote Manipulation," *Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control*, pp. 81~91.
 (2) Stackhouse, T., 1979, "A New Concept in Robot Wrist Flexibility," *Proc. of the Ninth Int. Symp. on Industrial Robots*, pp. 589~599.

(3) Hirose, S., 1993, *Biologically Inspired Robot*, Oxford Science Publication.
 (4) Ikeda, H., and Takanashi, N., 1985, "Joint Assembly Moveable Like a Human Arm," United States Patent Number 4,683,406.
 (5) Paljug, E., Ohm, T., and Hayati, S., 1995, "The JPL Serpentine Robot: a 12DOF System for Inspection," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3143~3148.
 (6) Asano, K., Obama, M., Arimura, Y., Kondo, M., and Hitomi, Y., 1983, "Multijoint Inspection Robot," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.IE-30, No. 3, pp. 277~281.
 (7) Nilsson, M., 1998, "Free Climbing Snake Robot," *IEEE Control Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 21~26.
 (8) Jacobsen S.C., Wood J. E., Knutti D. F., and Biggers K. B., 1984, "The UTAH/M.I.T Dextrous Hand: Work in Progress," *Int. J. of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21~50.
 (9) 최혁렬, 류성무, 백상훈, 조성휘, 송선진, 신현재, 전재욱, 2000, "지하매설 가스배관 내부검사용 로봇시스템 개발," 한국정밀공학회지, 제 17 권 제2호, pp. 121~129.
 (10) 류성무, 최혁렬, 1999, "가스관 내부검사용 주행로봇 개발," 대한기계학회논문집, 제23권 제 12호, pp. 2216~2225.
 (11) Sungmoo Ryew, Sangmoo Lee and Hyoukryeol Choi, 1999, "Design of Anthropomorphic Joint Mechanism," The 3rd International Workshop on Advanced Mechatronics, pp. 197~201.
 (12) Choi H. R. and Ryew S. M., 2000, "Anthropomorphic Joint Mechanism with Two Degrees of Freedom," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp. 1525~1530.